



M 2015

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE PEÇAS DE AÇO NA EMPRESA RAMADA AÇOS, SA

RODOLFO EMANUEL AMADO BRANDÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM MARÇO DE 2015

ORIENTADOR: Prof. José Fernando Oliveira

ORIENTADOR EMPRESARIAL: Engenheiro Jorge Oliveira



<i>CANDIDATO</i>	Rodolfo Emanuel Amado Brandão		<i>Código</i>	080508017
<i>TÍTULO</i>	Otimização do Sistema de Gestão de peças de aço na Ramada Aços, SA			
<i>DATA</i>	18 de Março de 2015			
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 14:30h			
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Laura Ribeiro	DEMM/FEUP	
	<i>Arguente</i>	Sérgio Sousa	UM	
	<i>Orientador</i>	José Fernando Oliveira	DEGI/FEUP	

Resumo

Este relatório enquadra-se no âmbito da realização da disciplina Dissertação, para conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O trabalho apresentado propõe um novo modelo para a gestão de compras no sector de aprovisionamentos da empresa Ramada Aços, SA.

A atual competitividade entre as empresas, não só em Portugal mas em todo o mundo obriga a um aperfeiçoamento contínuo da gestão dos seus aprovisionamentos, em busca de soluções cada vez mais vantajosas para si e para os seus clientes.

Este trabalho tem como objetivo específico, redefinir as medidas *standard* dos blocos de aço em forma de paralelepípedos, que a Ramada Aços compra aos seus fornecedores para depois cortar em peças de dimensões inferiores, tendo em conta o histórico de vendas e os cortes efetuados.

Primeiro, foi analisado, *in loco*, o modo de funcionamento da empresa, em particular a forma como a empresa programa e faz as compras e os cortes das peças. Foi analisado também o histórico dos registos de vendas e determinaram-se os pontos a melhorar tendo em conta todas as restrições ao problema.

De seguida, foi desenvolvido um modelo matemático que permite determinar as medidas *standard* ótimas e que incorpora as restrições entretanto levantadas. O modelo foi incorporado numa ferramenta de apoio à decisão desenvolvida em MS Office Excel. Dado o histórico de vendas essa ferramenta permite determinar, usando o “Solver” do Excel, as medidas *standard* ótimas a comprar, assim como o valor da função objetivo para essa solução.

Por fim, é feita uma análise ao relatório de resposta do *Solver* do Excel e são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

No final deste trabalho ficaram definidas algumas dimensões de peças *standard* para apenas uma amostra dos dados existentes. A empresa vende peças com uma vasta gama de medidas diferentes, mas para este trabalho foram estudadas apenas as peças com largura até 450mm e espessura até 30mm.

Optimization of steel parts management system in Ramada Aços, SA

Abstract

This project was developed under the Dissertation of Integrated Master in Metallurgical and Materials Engineering of FEUP in collaboration with Ramada Aços, SA.

The work presented proposes a new model for purchasing management in the company Ramada Aços, SA.

The current competitiveness between companies, not only in Portugal but worldwide requires the continuous improvement of their supply chain management, in search of increasingly viable solutions for companies and their clients.

This work has the specific objectives of redefining the standard measures, i.e. measures of the parts, being this parts steel parallelepiped blocks, that Ramada Aços purchase from their suppliers and then cut into smaller size pieces, taking into account the sales history and made cuts.

First, it was studied how the company works, *in loco*, how they do the purchasing management and the steel blocks cutting. A data analysis was done, and then were determined some points to improve attending to the problem constraints.

Then, it was developed a mathematical model in which were defined the decision variables, constraints and the objective function of the problem.

It was also developed a support tool to decide which standard measures should be bought using MS Office Excel and was calculated the value of the decision variables and the objective function through the "Solver" tool of Excel.

Finally, an analysis of the Excel Solver response report was made and also some suggestions for future work.

At the end of this study we can find that were defined some standard parts dimensions, but only for a sample of the existing data. The company sells steel parts with width up to 450mm and height up to 30mm. This means that work in this project can't stop here.

Agradecimentos

Durante a elaboração desta dissertação tive o apoio de várias pessoas, sem as quais a conclusão do mesmo e do Mestrado não seria possível.

Primeiro, deixo o meu especial agradecimento ao meu orientador da FEUP, Prof. José Fernando Oliveira por todo o seu apoio e ajuda durante a realização deste trabalho contribuindo para o seu sucesso.

Quero também agradecer ao meu orientador na empresa, Eng.º Jorge Oliveira e também ao Eng.º Joaquim Melo por todo o acompanhamento que me deram durante e máxima disponibilidade demonstrada durante a realização do trabalho. Agradeço à empresa Ramada Aços, SA pela oportunidade de trabalhar com uma equipa com tanta experiência e conhecimento.

Agradeço a todos os meus amigos pela amizade e apoio que me deram durante toda esta etapa.

Por fim e mais importante, agradeço à minha família e namorada por todo o apoio incondicional e confiança que me deram durante esta fase crucial da minha vida.

Índice de Conteúdos

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Agradecimentos.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 A distribuição de aço a retalho na Ramada Aços, SA	4
2.1 Apresentação da empresa	4
2.2 Terminologia e algumas considerações	5
2.3 Processos de corte e venda de peças de aço.....	6
2.4 Descrição do problema	8
Exemplo 1	9
Exemplo 2	9
2.5 Restrições do problema	14
2.6 Objetivos propostos.....	14
3 Revisão da literatura	16
3.1 Problemas de corte e empacotamento	16
3.2 Problemas de <i>assortment</i>	18
4 Modelo de otimização.....	21
4.1 Modelo	23
Índices	23
Dados.....	23
Variáveis de decisão	24
Variáveis auxiliares.....	24
Restrições	25
Coeficientes da função objetivo	25

Função Objetivo	26
5 Implementação do modelo desenvolvido.....	27
6 Avaliação do modelo desenvolvido.....	43
6.1 Dados do problema	43
6.2 Avaliação dos resultados	44
6.3 Testes ao modelo	48
7 Conclusões e desenvolvimentos futuros	51
7.1 Conclusões	51
7.2 Desenvolvimentos futuros.....	52
Referências.....	53

Lista de Figuras

Figura 1 - Blocos de aço guardados dentro do armazém.	5
Figura 2 - Blocos de aço guardados no exterior do armazém.	5
Figura 3 - Fluxograma do processo desde o pedido do cliente até à entrega ao cliente.	7
Figura 4 - Um dos serrotes utilizados na empresa.	8
Figura 5 - Exemplo de corte na espessura.	9
Figura 6 - Esquema representativo da falha na passagem de informação entre departamentos.	11
Figura 7 - Quantificação do peso consumido no ano anterior correspondente às várias gamas de medidas definidas pela empresa.	12
Figura 8 - MRP (Master Requirements Planning) da empresa.	13
Figura 9 - Corte não guilhotinado (à esquerda) e não guilhotinado (à direita).	17
Figura 10 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 1).	28
Figura 11 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 2).	30
Figura 12 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 3).	31
Figura 13 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 4).	31
Figura 14 - Representação em Excel das variáveis de decisão.	32
Figura 15 - Atribuição do valor 1 a algumas das variáveis de decisão binárias.	32
Figura 16 - Indicação do número das células às quais foi atribuído o valor 1.	33
Figura 17 - Indicação das medidas que abastecem as restantes inferiores.	34
Figura 18 - Indicação das medidas Standard (Largura e Espessura).	34
Figura 19 - Valores calculados para cada venda a partir dos registos de vendas.	35
Figura 20 - Indicação dos valores registados numa venda.	35
Figura 21 - Coeficiente da função objetivo.	36

Figura 22 - Custo de corte de 1mm^2 na a espessura e na largura.....	37
Figura 23 - Valor da função objetivo.	37
Figura 24 - Adição da restrição “ Limite de uma largura por espessura”.	38
Figura 25 - Adição da restrição “Todas as vendas são cobertas por pelo menos uma medida <i>standard</i> ”.	38
Figura 26 - Peso correspondente ao vendido no período anterior.	40
Figura 27 - Restrição “ Mínimo de encomenda”.	40
Figura 28 - Parâmetros introduzidos no Solver do MS Office Excel.	41
Figura 29 - Exemplo de dados referentes às vendas do período anterior.	44
Figura 30 - Janela de resultados do Solver.	45
Figura 31 - Janela de descrição de parâmetros do Solver.....	45
Figura 32 - Parte do relatório de resposta do Solver - Função Objetivo.	46
Figura 33 - Parte do relatório de resposta do Solver - Variáveis de decisão.	47
Figura 34 - Parte do relatório de resposta do Solver - Restrições.....	48
Figura 35 - Alteração da restrição "Máximo de larguras por espessura".	49
Figura 36 - Valor da função objetivo com alteração da restrição "Máximo de larguras por espessura"......	49
Figura 37 - Alteração dos custos de corte.	49
Figura 38 - Escolha de medidas <i>standard</i> com alteração dos custos de corte.....	50
Figura 39 - Valor da função objetivo quando os custos de corte são alterados.	50

Abreviaturas

C&P - Cutting and Packing

MI - Medidas Irregulares

NEI - Nota de Execução Interna

NP - Non-deterministic Polynomial-time

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em ambiente empresarial com a colaboração da empresa Ramada Aços, SA.

Para ser possível realizar este trabalho foi necessária a permanência na empresa, obtendo o apoio dos vários departamentos relacionados com o negócio de Aços Especiais, incluindo o armazém.

A Ramada Aços, SA pertence ao grupo Ramada Investimentos, desenvolvendo atividade em cinco áreas, todas elas com um denominador comum, o Aço. A área de negócio que ocupa maior percentagem entre todas as atividades da empresa consiste na distribuição de Aços Especiais a retalho essencialmente para a indústria metalomecânica. O negócio consiste, em linhas gerais, na compra de grandes blocos de aço a fornecedores na sua maioria internacionais, no seu posterior corte e venda a retalho aos clientes. As peças podem ainda sofrer etapas de maquinação e de tratamentos térmicos.

1.2 Objetivos

Esta dissertação teve como objetivo a construção de um algoritmo de otimização das compras na empresa Ramada Aços, SA. O desenvolvimento deste modelo consistiu na automatização e criação de uma ferramenta de apoio à decisão para o sector de compras que permita no futuro reduzir o valor de *stock* assim como o desperdício/sucata.

O problema abordado pode ser definido como um problema de *assortment* onde se pretende selecionar algumas medidas como *standard*, dentre um conjunto de medidas possíveis. Por outras palavras, a empresa recebe encomendas por parte dos seus clientes onde estes especificam as medidas da peça que pretendem comprar, tendo a peça que ser entregue ao cliente num prazo de poucos dias. Como as peças compradas aos fornecedores por parte da Ramada Aços demoram cerca de cinco meses a serem entregues, é necessário ter peças em *stock* que serão cortadas de forma a satisfazer todas as encomendas. É de salientar que os pedidos por parte dos clientes são muito heterogéneos. Desta forma, para obter as peças pedidas pelos clientes, minimizando o corte das peças, a empresa compra blocos com diferentes medidas.

A estes blocos de aço que são comprados aos fornecedores da Ramada Aços chama-se peças de medidas *standard*. As peças *standard* são definidas apenas pela largura e pela espessura, sendo o comprimento determinado de acordo com as restrições impostas pelos fornecedores relativamente ao peso mínimo de encomenda.

Como o número de vendas é elevado e os pedidos dos clientes são bastante diversificados, não é possível ter em *stock* peças com todas as medidas que a empresa prevê vender. Daí ser necessário selecionar algumas medidas como *standard* que serão as medidas das peças encomendadas aos fornecedores, e a partir das quais serão obtidas todas as peças pedidas pelos clientes.

A Ramada Aços tem vindo, já há alguns anos, a estudar este problema, mas a solução que têm revelado não ser a mais adequada levando a empresa a prosseguir o estudo deste complexo problema.

Neste trabalho é proposto um modelo e uma nova ferramenta que permite selecionar as medidas *standard* mais apropriadas, baseando-se no histórico de vendas da empresa.

Portanto, o objetivo é redefinir as Medidas *Standard* (espessura e largura) dos blocos a comprar.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, cujos conteúdos serão resumidamente descritos de seguida.

No primeiro e presente capítulo, é realizada uma breve introdução ao trabalho, referindo-se o enquadramento e os objetivos da sua realização.

No segundo capítulo, encontra-se uma apresentação da empresa e a descrição da sua atividade, detalhando os processos de corte e venda. Nesse mesmo capítulo também é descrito o problema existente na gestão das compras da empresa, mostrando-se como esta é feita atualmente, assim como, as restrições ao problema, tanto as impostas pelos fornecedores, pela administração, assim como as relativas aos serrotes disponíveis. Por fim são enunciados os pontos que devem ser alvo de melhoria.

No terceiro capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre problemas de corte e empacotamento, um problema relacionado com o abordado neste trabalho, e depois sobre problemas de *assortment* onde se insere o problema da dissertação.

O quarto capítulo apresenta o modelo matemático desenvolvido para este problema específico, começando por descrever de forma sucinta o modelo, apresentando-se de seguida o modelo matemático propriamente dito. Neste modelo são referidos os índices, os dados, as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo do problema.

O quinto capítulo foca-se na explicação, passo a passo, de como foi feita a implementação do modelo matemático no MS Office Excel e depois na sua introdução no Solver. São apresentadas imagens referentes a todas as tabelas construídas e também referentes à janela de introdução de parâmetros do Solver, para permitir uma melhor compreensão.

O sexto capítulo deste relatório, introduz-nos aos dados do problema. Neste também é apresentada uma avaliação do modelo implementado no Excel, fazendo uma leitura do relatório de resposta do Solver e apresentando alguns testes realizados, que permitem validar a aplicação futura da ferramenta.

O sétimo, e último capítulo deste trabalho, expõe algumas conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

No fim são ainda apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para o trabalho bem como os anexos digitais que contêm a ferramenta desenvolvida em Excel.

2 A distribuição de aço a retalho na Ramada Aços, SA

2.1 Apresentação da empresa

Ramada Aços SA é uma empresa pertencente ao Grupo Ramada Investimentos com sede em Ovar, Aveiro, fundado em 1935. Desenvolve atividade em diferentes áreas como:

- Aços Especiais;
- Aços Laminados e Estirados a Frio;
- Tratamentos Térmicos;
- Sistemas de Armazenagem;
- Ferramentas.

Esta empresa atua principalmente ao nível do fornecimento de aços especiais para a indústria metalomecânica, sendo o principal distribuidor de aço a retalho em Portugal, tendo um volume de negócios avaliado em 120M€ e possui um capital social de 15M€. Distingue-se pela qualidade dos seus aços, pelo fácil acesso do cliente, pelo fornecimento de peças pré-maquinadas e por fornecer aos seus clientes ferramentas de corte adequadas à maquinaria e a possibilidade de reenviarem as peças novamente de volta para serem tratadas termicamente.

A empresa possui uma rede de distribuição com armazéns e escritórios de venda em Ovar, Lisboa, Porto, Marinha Grande, Águeda e Braga.

A principal área de negócio da Ramada Aços incide na compra de Aços Especiais para o seu posterior corte, se necessário, e distribuição a retalho principalmente para a indústria metalomecânica, em particular para a indústria de moldes.

O negócio consiste, na compra de grandes blocos de aço a diversos fornecedores, podendo estes ser vendidos inteiros (o que é raro) ou em dimensões mais pequenas, cortadas a pedido do cliente. Nas figuras 1 e 2, estão representados os blocos de aço que se encontram em *stock* dentro e fora do armazém, respetivamente. As peças em *stock* apresentam pesos que variam entre 10 kg até 25 toneladas aproximadamente. As suas medidas também são bastante variáveis, podendo o comprimento das peças atingir os 3500 mm, a largura 2500 mm e a espessura normalmente não ultrapassa os 1500 mm.



Figura 1 - Blocos de aço guardados dentro do armazém.



Figura 2 - Blocos de aço guardados no exterior do armazém.

A empresa tem assistido a uma evolução do mercado, pelo que, nos últimos anos tem aumentado a heterogeneidade em relação às medidas das peças pedidas pelos clientes. Assim, a gestão de aprovisionamentos passou de uma situação em que a empresa disponibilizava apenas algumas medidas de blocos de aço, entre as quais os clientes podiam escolher, para uma nova situação em que os clientes encomendam um conjunto qualquer de medidas, que a Ramada Aços tem que satisfazer, usando peças já existentes em *stock* ou cortando a partir de outras maiores. Esta nova situação permite aos clientes ter apenas o custo da peça que necessitam, não sendo estes forçados a comprar e a guardar nos seus armazéns as sobras das peças iniciais, de onde são cortadas as que realmente encomendaram.

Devido ao enorme volume de negócios da empresa é fundamental que esta tenha uma grande quantidade de peças em *stock* para que as encomendas dos clientes sejam todas satisfeitas. Isto exige, portanto, uma cuidada e programada gestão das compras e dos aprovisionamentos do armazém da empresa.

2.2 Terminologia e algumas considerações

A Ramada Aços compra blocos de aço aos seus fornecedores, blocos com medidas *standard* (espessura e largura). A decisão sobre quais as medidas *standard* da empresa é uma decisão crucial para a empresa pois dela depende diretamente o retorno que terão com a venda das peças. Este negócio consiste em, após receber os blocos no armazém,

cortá-los e vendê-los posteriormente a retalho. Apenas em muito raros casos, os blocos são vendidos nas suas medidas *standard*.

Chamaremos peças aos blocos de aço, podendo estes pertencer a uma das quatro categorias seguintes, ordenadas por ordem decrescente de valor:

- **Barra** - peça de medidas *standard* (comprada aos fornecedores) que não sofreu cortes na espessura e o seu comprimento é superior à largura;
- **MI** - peça de medidas irregulares - as barras tornam-se MI's quando são cortadas pela espessura ou pelo comprimento, ficando este com medida inferior à largura;
- **Ponta** - peça de pequenas dimensões e baixo peso (os limites tanto de dimensões como de peso são definidos internamente e são dependentes da qualidade do aço);
- **Sucata** - peças que não serão mais utilizadas.

2.3 Processos de corte e venda de peças de aço

Desde que uma peça é encomendada por um cliente, até à sua entrega ocorrem várias etapas que estão representadas na Figura 3. Numa primeira etapa, o cliente comunica o seu pedido ao departamento comercial de vendas, fornecendo a informação sobre as medidas da peça pretendidas, podendo ou não fornecer as tolerâncias exigidas. Feita a encomenda, o departamento de vendas faz um orçamento para a(s) peça(s) pedida(s) e envia-o para o cliente. Depois de aceite o orçamento proposto, a encomenda é lançada e é enviada uma NEI (nota de execução interna) para o armazém. Nessa NEI, é descrita a peça existente em *stock* mais apropriada, os cortes a serem executados, e também as sobras resultantes desses cortes, incluindo uma indicação sobre a sua classificação (MI, Ponta ou Sucata). Como nem sempre as sugestões automáticas são as mais adequadas é feita uma revisão manual da NEI. Se a sugestão, inicialmente proposta for a mais adequada, a peça segue imediatamente para a execução, caso contrário é definida de forma manual a peça que mais se ajusta à execução pretendida e são definidos os cortes a executar. Após a execução de todos os cortes, as peças são pesadas e estão prontas para enviar ao cliente.

O processo, desde o momento da encomenda até à entrega das peças ao cliente, normalmente ocorre dentro de um período de dois dias e encontra-se representado no fluxograma da Figura 3.

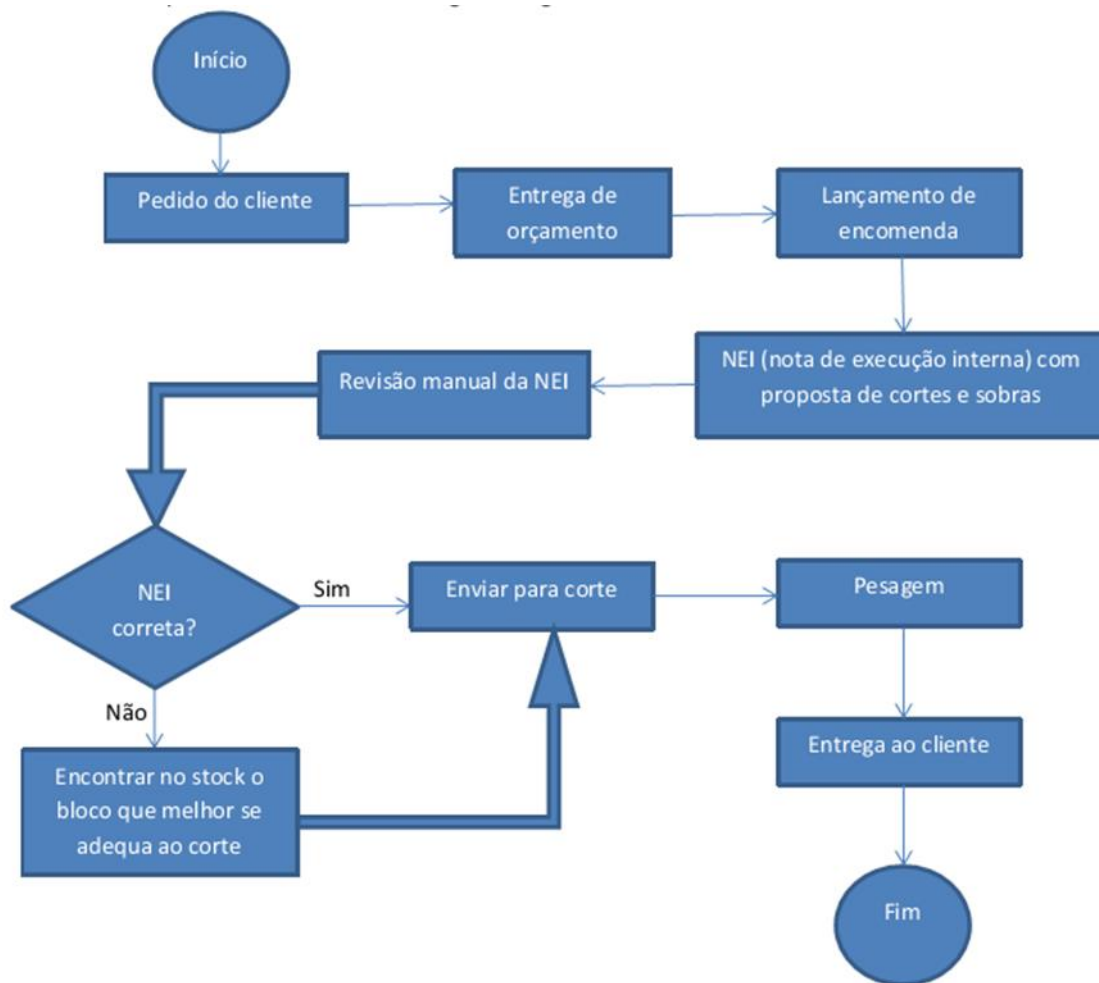


Figura 3 - Fluxograma do processo desde o pedido do cliente até à entrega ao cliente.

Para efetuar os cortes das peças, a empresa tem disponíveis 17 serrotes, porém nem todos permitem o corte de peças de grandes dimensões. Como, para além disso, a duração dos cortes pode ser de várias horas, a atribuição dos cortes aos serrotes é um outro problema de grande importância para a empresa. Na Figura 4 está representado um dos serrotes utilizados na empresa.



Figura 4 - Um dos serrotes utilizados na empresa.

2.4 Descrição do problema

A gestão de aprovisionamentos representa um papel relevante na gestão das empresas modernas. Desta forma, para a Ramada Aços, SA é também uma questão relevante. Este trabalho tenta solucionar algumas das dificuldades que esta empresa enfrenta no seu sistema de gestão de aprovisionamentos.

O atual programa de gestão de compras dos blocos de aço da Ramada Aços, SA, indica unicamente a quantidade a encomendar de cada medida *standard* já pré-definida. Como tem havido uma grande variação nas medidas encomendadas pelos clientes, as medidas *standard* definidas há alguns anos atrás deixaram de ser as adequadas para este momento. Com a ferramenta desenvolvida irá ser possível determinar dinamicamente as medidas *standard* com base no histórico e portanto atualizar essa informação mais vezes. Para tal é necessário relacionar o histórico de vendas, as MI's criadas internamente e as limitações impostas pela direção quanto ao valor imobilizado em *stock*.

Na situação atual, a Ramada Aços tem pré-definidas algumas medidas *standard*, a partir das quais são cortadas todas as outras peças da forma mais conveniente. Devido à enorme quantidade e diversidade de encomendas anuais torna-se problemático gerir e garantir que estas medidas sejam as mais indicadas.

Portanto, o que se observa é que, devido à heterogeneidade dos pedidos por parte dos clientes, as peças *standard* escolhidas para o ano em causa, podem não ser as ideais para o ano seguinte. Não sendo possível ter em *stock* peças com todas as medidas que podem vir a

ser encomendadas, torna-se necessário encontrar a situação que permite dar a melhor resposta às necessidades dos clientes, minimizando o desperdício e o número de cortes necessários.

Outro problema reside na ineficiente automatização da transmissão de informação entre os vários departamentos da empresa. Os exemplos 1 e 2 retratam situações que acontecem atualmente demonstrando a ineficiência referida anteriormente.

Exemplo 1

Quando um bloco com espessura X é cortado em dois blocos, um com espessura Y que é enviado para o cliente e outro com espessura Z , que vai para *stock*, no sistema de gestão de compras fica registado que foi consumido/vendido o bloco completo de espessura X , embora com este corte seja criada a *MI* de espessura Z .

Na figura 5, é ilustrada a situação de corte na espessura referida acima.

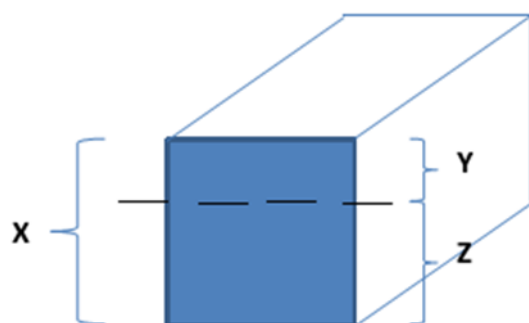


Figura 5 - Exemplo de corte na espessura.

O programa de gestão de compras dá indicação da necessidade de compra de um bloco com as dimensões do bloco inicial, quando na realidade se deveriam considerar as medidas realmente vendidas ao cliente.

Por exemplo: o cliente pede um bloco de 280 mm de espessura, mas só existe em *stock* um bloco de 400 mm. Esse bloco de 400 mm será cortado e entregue ao cliente com 280 mm. O problema é que no sistema de gestão (de compras), dá saída da peça com 400 mm de espessura, sendo por isso esta a medida que vai ser encomendada novamente aos fornecedores.

Exemplo 2

Dando-se como exemplo a venda de uma peça com 2000 x 400 mm (largura x espessura) cortada a partir de uma outra peça com 2000 x 410 mm (sendo esta uma peça *standard*),

as informações transmitidas automaticamente entre vendas, compras e *stocks* são as seguintes:

1. O departamento de vendas recebe informação sobre as medidas pedidas pelo cliente (2000 x 400) e transmite-as ao armazém;
2. O armazém regista a saída da peça a partir da qual vai ser feito o corte (2000 x 410) e depois a entrada da MI criada após o corte (2000 x 10).
3. O departamento recebe informação sobre as medidas da peça que foi usada para execução do corte (2000 x 410).

Portanto, a não ser que a medida seleccionada para corte seja *standard*, não chegará à secção “Compras” a informação real sobre os consumos. Esta secção apenas recebe informação sobre o consumo de peças com medidas *standard*, quando estas são cortadas. Se a peça utilizada para corte não for *standard* mas sim uma MI existente em armazém, a secção “Compras” não recebe qualquer informação, tal como se pode ver na Figura 6.

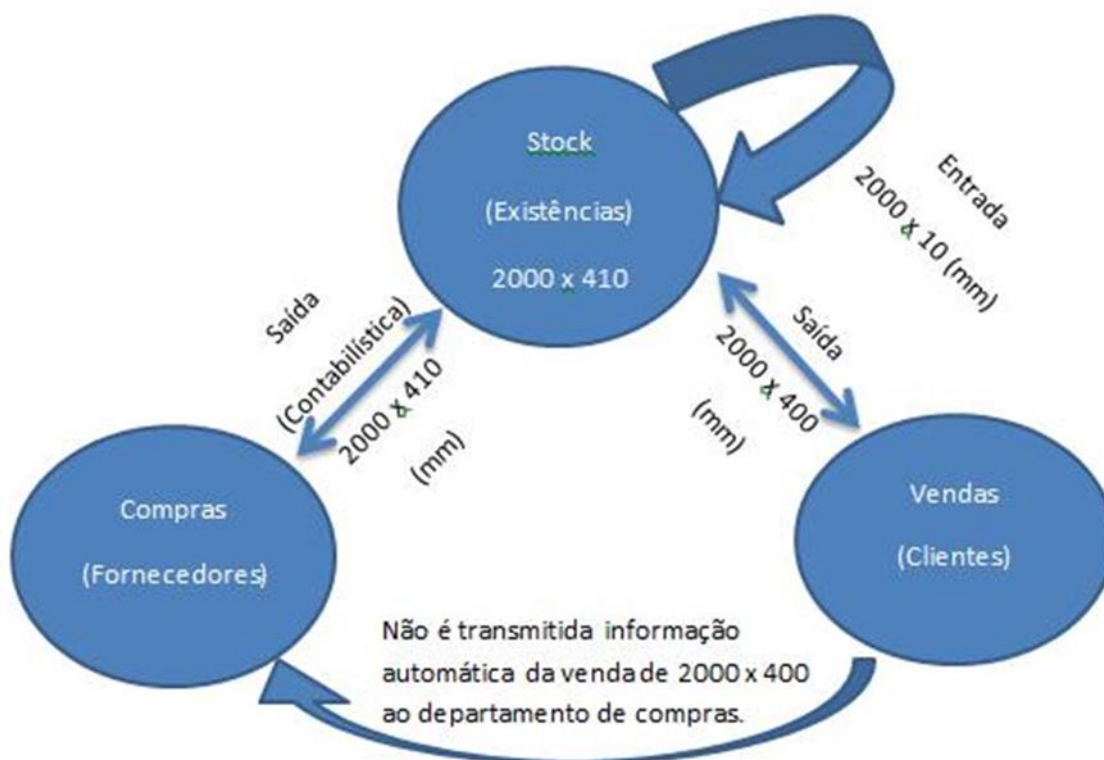


Figura 6 - Esquema representativo da falha na passagem de informação entre departamentos.

Quando há rotura de *stock* de peças *standard*, com as medidas mais próximas das da peça encomendada pelo cliente, corta-se a partir de uma peça *standard* com as medidas imediatamente superiores, resultando na criação de MI's com maiores dimensões, o que não é desejado pois pretende-se sempre minimizar as sobras do corte.

A Ramada Aços definiu já há alguns anos as medidas para as peças *standard*. Essas peças têm permitido abastecer todas as outras, ou seja, a partir do corte destas peças é possível obter todas as peças com dimensões menores e responder aos pedidos dos clientes. Contudo, atualmente, as medidas *standard* utilizadas já não são as mais apropriadas pois as encomendas dos clientes têm agora outras dimensões. Essa inadequação entre as medidas *standard* e os mais recentes tipos de encomendas dos clientes provoca uma excessiva acumulação de peças em *stock*.

O aumento da competitividade no mercado nos últimos anos fez com que fosse necessário reduzir bastante o valor de *stocks* obrigando também à diminuição do desperdício, neste caso sucata.

Na Figura 7, encontra-se representada uma tabela construída pela empresa no sentido de contabilizar e agrupar em intervalos de medidas (espessura e largura) as peças vendidas num determinado período. Nas células com fundo branco são apresentados os pesos totais

das vendas para cada conjunto de intervalos de medidas (largura/espessura). Esta tabela servia de base à empresa para selecionar as medidas com maiores consumos como medidas *standard*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		min.	Máx.		Min	Degrau		Min	Degrau			
2	Esp.	0	50	Largura	0	50	Comp.	0	100			
3	Comprimentos		0	101	201	301	401	501	601	701	801	901
4	Larguras		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
5	0	50	8321	224	176	75	37	70	0	0	0	0
6	51	100	487	1888	843	277	91	59	19	0	0	0
7	101	150	0	2000	1881	447	101	18	141	0	0	0
8	151	200	0	567	2134	381	191	92	123	0	0	0
9	201	250	0	0	844	721	236	79	55	0	0	0
10	251	300	0	0	221	694	683	389	0	0	0	0
11	301	350	0	0	0	250	372	0	0	0	0	0
12	351	400	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0
13	401	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	451	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	501	550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	551	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	601	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	651	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	701	750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	751	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	801	850	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	851	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	901	950	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	951	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1001	1050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1051	1100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	1101	1150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1151	1200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29			8808	4679	6100	2844	1710	745	338	0	0	0

Figura 7 - Quantificação do peso consumido no ano anterior correspondente às várias gamas de medidas definidas pela empresa.

Na Figura 8 representa-se o MRP da empresa que permite obter informação acerca de quais as quantidades a comprar de cada medida *standard*. Note-se que esta ferramenta não apoia decisões sobre as medidas *standard* a adquirir. Na Figura 8 são apresentados apenas três conjuntos de medidas, existindo no entanto muitos mais. Todos os indicadores e células com valor zero correspondem às medidas que não estão a ser consumidas/compradas pela Ramada Aços. No terceiro conjunto de medidas (2000 x 410), são representados vários valores para estes indicadores:

Stock físico corresponde ao peso do aço armazenado no armazém;

Stock médio corresponde ao peso relativo ao consumo médio de peças com esse conjunto de medidas (neste caso 2000 x 410) para período anterior;

- C** corresponde ao peso consumido correspondente a esse conjunto de medidas (para os 12 meses anteriores);
- E** corresponde ao peso das encomendas efetuadas de peças com esse conjunto de medidas (para os 12 meses seguintes);
- EP** corresponde ao que se espera ter em stock nesse mês (período seguinte). Note-se que as medidas definidas como standard nunca são alteradas com esta ferramenta.

Analisando por exemplo na Figura 8 o conjunto de peças com as medidas 2000x410 mm, como cada coluna corresponde a um mês do ano seguinte no caso de EP, a empresa prevê que dentro de dez meses o *stock* dessas peças será nulo pelo que devem encomendar pelo menos 5 meses antes que é o tempo previsto de entrega por parte dos fornecedores.

0539B0400015000 *AÇO 2738 SUPER REC 1500X400 Stock Físico: 0/ 0 Consumo Médio: 0													
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0539B0400020000 *AÇO 2738 SUPER REC 2000X400 Stock Físico: 0/ 0 Consumo Médio: 0													
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0539B0410020000 AÇO 2738 SUPER REC 2000X410 Stock Físico: 68416/ 68416 Consumo Médio: 9,886													
C	13,350	31,405	3,534	0	6,141	23,985	853	23,525	0	245	15,475	108	
E	0	24,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
EP	68,416	82,855	72,973	63,087	53,201	43,315	33,425	23,545	13,657	3,770	-6,115	-16,001	

Figura 8 - MRP (Master Requirements Planning) da empresa.

Como foi dito, o MRP apenas faz uma proposta das quantidades a adquirir de cada produto num determinado momento. Um MRP não “decide” que produtos a empresa deve adquirir. Através do uso desta ferramenta, a empresa consegue:

- Garantir que os materiais estão disponíveis para corte e posteriormente para entrega ao cliente;
- Manter os níveis de *stock* baixos;
- Planear as atividades de corte, os prazos de entrega e as compras.

No entanto, esta ferramenta não satisfaz completamente as necessidades da empresa, pelo que se pretende reduzir ainda mais os níveis de *stock* e o valor despendido nas compras em cada período.

Neste trabalho procura-se melhorar estes pontos através da utilização dos registos de vendas, não por intervalos de valores de medidas mas utilizando todos os registos individualmente e criando uma ferramenta que permita em cada período escolher/definir as medidas *standard* mais apropriadas, adequando-se sempre ao mercado da época e às suas necessidades. Para isso foi construída uma ferramenta que permita fazer essa “escolha” dos blocos a adquirir por parte da empresa, sendo depois os resultados desta ferramenta passados para o MRP em forma de dados.

2.5 Restrições do problema

Alguns pontos importantes a ter em conta na previsão e realização das compras dos blocos de aço na Ramada Aços são os seguintes:

- Os cortes das peças são obrigatoriamente realizados em toda a extensão de uma dimensão (Guilhotinados);
- O peso das peças não deve exceder as 25 toneladas;
- Problema tridimensional (por exemplo, a largura não tem que ser sempre obtida a partir da largura inicial);
- As dimensões máximas de corte dos serrotes são diferentes para cada um e a dimensão máxima é de 3500mm.
- As peças não devem permanecer em stock mais de 4 meses;
- Para espessuras entre 10 e 40 mm, o valor (em peso) mínimo de uma encomenda imposto pelos fornecedores é de 6 toneladas;
- Para espessuras entre 40 e 120 mm, o valor (em peso) mínimo de uma encomenda imposto pelos fornecedores é 12 toneladas;
- Para espessuras entre 120 e 200 mm, o valor (em peso) mínimo de uma encomenda imposto pelos fornecedores é 20 toneladas;
- Para espessuras acima de 200 mm, o valor (em peso) mínimo de uma encomenda imposto pelos fornecedores é de 25 toneladas;

2.6 Objetivos propostos

O principal objetivo neste relatório será construir um modelo que permita redefinir as Medidas *Standard* (espessura e largura) dos blocos a comprar, minimizando o custo de

corte das peças, quando cortadas a partir de peças *standard* (barra), definindo um número limitado de medidas *standard*.

3 Revisão da literatura

3.1 Problemas de corte e empacotamento

Um dos problemas nos negócios como o da Ramada Aços consiste na forma como são feitos os cortes sucessivos e guilhotinados das peças de aço, de forma a originar peças mais pequenas. Com a competitividade atual do mercado e das empresas, estas necessitam de diminuir os custos de todas as formas possíveis, e uma forma de o fazer é na programação dos cortes das peças de forma a aproveitar uma maior quantidade das peças a partir de cada corte e de cada peça (diminuindo a sucata).

O empacotamento é uma função crucial para a eficiência da gestão de cadeias de abastecimento. Um mau desempenho neste campo resulta em custos desnecessários (por exemplo, custo de mais contentores a serem carregados e transportados) e num serviço ao cliente insatisfatório (por exemplo, falha nas datas de entrega). [1]

Não estando totalmente relacionado com o problema em questão neste trabalho, os problemas de corte e empacotamento estão relacionados com o tipo de negócio desenvolvido na Ramada Aços sendo esta uma empresa de venda de aço a retalho.

Os problemas C&P têm vindo a ser estudados há alguns anos, sendo os problemas 3D um alvo de estudos mais recentes. É neste campo que o presente problema se insere. [2] Os problemas de corte e empacotamento 3D estão ainda num nível de investigação baixo pelo que existem ainda muitas questões que não foram tratadas de forma satisfatória até agora. [1]

Os problemas de empacotamento podem ser interpretados como problemas de afetação geométricos, em que pequenos itens tridimensionais (chamados de carga) são atribuídos (embalados em) a grandes objetos retangulares tridimensionais (chamados contentores), tais que uma determinada função objetivo é otimizada e duas condições geométricas básicas são satisfeitas, ou seja,

- Todos os pequenos itens se encontram inteiramente no interior do contentor;
- Os itens não se sobrepõem.

Em geral, os pequenos itens podem ter qualquer tipo de forma regular (retangular, esférica, etc.) ou irregular. No entanto, a maior parte dos estudos realizados nesta área focam-se apenas em itens retangulares, referindo-se a esses itens como "caixas". Apesar da consideração de itens apenas retangulares ser uma falha ainda nos problemas de

empacotamento 3D, no caso de estudo deste trabalho os itens são realmente todos retangulares. [1], [2]

Os problemas de corte de grandes objetos para produzir outros mais pequenos têm sido estudados exaustivamente a uma e duas dimensões. Para este caso interessa apenas o estudo de cortes a três dimensões restringido aos cortes guilhotinados. [3]

Um corte guilhotinado corresponde a um corte paralelo a um dos lados da peça e é feito de um lado até ao lado oposto. Na Ramada Aços, todos os cortes realizados são guilhotinados. [3]

Na Figura 9 podem ver-se, exemplos de cortes guilhotinados e não guilhotinados.

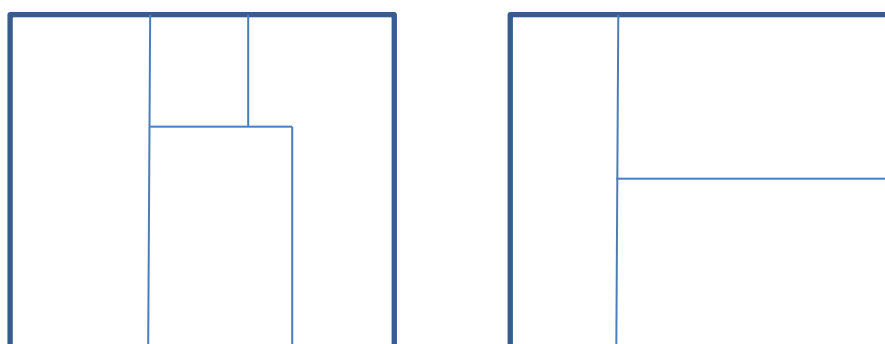


Figura 9 - Corte não guilhotinado (à esquerda) e guilhotinado (à direita).

De forma a facilitar a leitura dos seguintes problemas mencionados, considera-se contentor como o recipiente onde são colocadas as caixas nos problemas de empacotamento, e como peça de maiores dimensões de onde são cortadas e criadas as caixas de menores dimensões.

Alguns dos problemas estudados na bibliografia são:

- *Three-dimensional unbounded knapsack problema (3UK)*: Consiste em, dado um contentor B com dimensões (L, W, H) e uma lista T de n tipos de caixas, cada tipo i com dimensões (l_i , w_i , h_i) e valor v_i , $i=1, \dots, n$, o que se pretende determinar neste problema é de que forma se deve cortar B de forma a criar caixas de alguns tipos de T de forma a maximizar o valor total de caixas criadas.
- *Three-dimensional cutting stock problem (3CS)*: Neste tipo de problema, dado um número ilimitado de contentores idênticos B com dimensões (L, W, H) e um conjunto de n tipos de caixas (l , w , h , d), pretende-se determinar como cortar o

menor número de contentores B de forma a produzir d_i unidades de cada tipo de caixa i , $i=1,...,n$.

- *Three-dimensional cutting stock/bin packing problem with variable stock/bin sizes (3CSV)*: neste caso, dada uma quantidade ilimitada de b tipos diferentes de contentores $B_1,...,B_b$, cada contentor B_j com dimensões (L_j, W_j, H_j) e valor V_j (número de contentores de cada tipo), e um conjunto de n tipos de caixas (l, w, h) , determinando-se como cortar os contentores dados de forma a gerar d_i unidades de cada tipo de caixa i , $i=1,...,n$ de forma a que o valor total de contentores usados seja o menor possível.
- *Three-dimensional strip packing problem (3SP)*: Neste ultimo caso, dada uma tira 3D B com dimensões (L, W, ∞) (um contentor com dimensões inferiores (L, W) e altura infinita) e um conjunto de n tipos de caixas (l, w, h, d) , pretende-se determinar como cortar a tira B de forma a gerar d_i unidades de cada tipo de caixa $i=1,...,n$ e a altura da parte da tira utilizada seja minimizada.

Todos os problemas acima mencionados são do tipo *NP-hard* (*Non-deterministic Polynomial-time hard*). Esta é uma classe de problemas considerados “pelo menos tão difíceis quanto os problemas mais difíceis em *NP*”. [3]

Podendo o estudo destes problemas contribuir para perceber o problema existente na Ramada Aços, pois este está implícito em vários dos problemas mencionados anteriormente podendo ser considerado uma mistura de vários problemas *NP-hard*. [3]

3.2 Problemas de *assortment*

A Ramada Aços depara-se com dois problemas: primeiro, quantos conjuntos de medidas diferentes deverão ser selecionados para efetuar as encomendas aos fornecedores, e segundo, quais deverão ser as medidas encomendadas aos fornecedores. As duas questões estão relacionadas, sendo que a solução para a primeira vai influenciar a solução da segunda. Em relação ao primeiro problema, se por um lado ao ser selecionado um grande número de conjuntos de medidas consegue-se diminuir os tempos de corte (que é um fator importante para a empresa, por outro lado vai aumentar o custo de manter as peças armazenadas obrigando também a empresa a encomendar uma maior quantidade de peças de forma a respeitar os limites mínimos de encomenda por parte dos fornecedores. Determinar o número de conjuntos de medida a encomendar é uma tarefa bastante

complexa, pelo que a empresa não pretende definir um valor fixo, limitando a escolha apenas a uma largura por cada valor de espessura, como descrito no capítulo 2.

Relativamente ao segundo problema, pretende-se determinar quais as medidas que devem ser encomendadas aos fornecedores, de forma a minimizar os custos que se terá nas operações de corte e a satisfazer as restrições impostas pelos fornecedores. A empresa acredita que através do histórico de registos de vendas da empresa, é possível definir as medidas *standard* mais apropriadas estando confiantes de que os pedidos dos clientes no ano seguinte serão semelhantes aos do ano anterior.

O problema a abordar insere-se na categoria dos problemas de *assortment* (sortidos), pois trata-se do corte de grandes peças retangulares, deparando-se com o problema de escolher as peças mais adequadas para responder aos pedidos dos clientes.

Na literatura podem-se encontrar vários problemas de *assortment* semelhantes pertencentes ao conjunto dos problemas C&P.

Segundo Pentico [4], a definição de *assortment* consiste na “*determinação de possíveis conjuntos de dimensões ou qualidades de um produto que devem ser armazenados em stock quando não é possível ou desejado armazená-los todos e a sua substituição numa direção (maior para o menor ou melhor qualidade para pior qualidade) é possível a um determinado custo*”.

Beasley [5] desenvolveu um algoritmo heurístico para problemas de corte guilhotinado baseado num procedimento ambicioso para gerar padrões de corte bidimensional e um procedimento para decidir qual o melhor subconjunto de retângulos a cortar.

Gemmill e Sanders [6] propuseram um método para determinar a dimensão ou as peças em *stock* bem como o número de tamanhos únicos em *stock*. Gemmill [7] noutro trabalho introduz o uso de algoritmos genéticos na solução do problema de *assortment* e é feita uma comparação entre os resultados obtidos com o algoritmo genético e os resultados obtidos com um método heurístico já existente.

Agrawal [8] discute no seu trabalho os métodos desenvolvidos por uma empresa automóvel para determinar as dimensões das folhas em *stock* de forma a minimizar a perda total de material durante o desbaste. A empresa armazena folhas com um determinado número de dimensões e produz um certo número de peças, usando-as. Agrawal tenta minimizar a quantidade de folhas armazenadas em *stock*.

Holthaus [9] propôs uma solução para um problema algo semelhante com o descrito nesta dissertação. O seu trabalho considera um problema de *assortment* unidimensional

que inclui a determinação do número de dimensões diferentes de comprimentos *standard* para serem mantidos em *stock* e serem usados para cumprir um determinado conjunto de ordens de corte.

Kasimbeyli et al. [10] desenvolveram um trabalho que considera um problema de *assortment* e de corte unidimensional. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático sem o uso de padrões de corte como parâmetros do modelo. É proposto um novo modelo de programação de dois objetivos inteira e linear sob a forma de minimização simultânea de dois objetivos contraditórios relacionados com a perda total de material durante o desbaste e o número total de rolos em *stock* com comprimentos diferentes com os quais se pretende satisfazer um certo conjunto de ordens de corte.

O trabalho de Holthaus e o de Kasimbeyli et al. [9],[10] são os que mais se aproximam do tema estudado na presente dissertação.

4 Modelo de otimização

Neste capítulo é feita a descrição do modelo construído para o problema de *assortment* em questão. O objetivo do modelo consiste em selecionar as medidas *standard*, que são as medidas encomendadas aos fornecedores pela Ramada Aços.

Neste capítulo são apresentados todos os componentes do modelo, desde os índices, os dados, as variáveis de decisão e as restrições, até por fim ser apresentada a função objetivo, a qual será de minimização.

A Ramada Aços compra aos seus fornecedores peças de aço com dimensões *standard*:

- de comprimento $s, s=1, \dots, ns,$
- de largura $i, i=1, \dots, ni$
- de espessura $j, j=1, \dots, nj.$

Estas peças serão depois enviadas para corte para serem entregues ao cliente com uma dimensões que deixam de ser *standard* (MI)

- com largura $k, k=1, \dots, nk$
- com espessura $t, t=1, \dots, nt.$

Quando a empresa quer fazer uma compra, necessita de ter informação sobre qual o comprimento, a largura e a espessura para comunicar ao fornecedor. Envia essa informação sobre os valores da *largura standard* li e da *espessura standard* ej . Também é necessário dizer qual o comprimento pretendido, o comprimento *standard*, mas esta dimensão tem uma noção diferente das outras pois, apesar de ser *standard*, é sempre escolhida uma medida diferente para cada ordem de compra. Esta escolha depende do peso necessário para satisfazer os pedidos do cliente, ou seja, estando já definidas a largura e espessura *standard*, escolhe-se o comprimento que ao multiplicar pelo valor das outras duas dimensões e pela densidade do aço, igualam o valor em peso necessário.

As variáveis de decisão do modelo são binárias, $x_{ij} \in \{0,1\}$, e correspondem aos conjuntos de medidas possíveis de serem selecionados como *standard*. As variáveis tomam portanto o valor 1, se esse conjunto de medidas for escolhido, ou 0 se não.

O controlo das peças é realizado através do seu peso, sendo assim é calculado o custo de uma peça, ou seja, o custo é calculado não por mm ou mm² mas sim por Kg de aço.

Assim, é necessário introduzir uma variável auxiliar ao modelo que traduza o peso total anual de vendas associado a uma medida (li, ej) :

$$Q_{ij} = (V_{ij} - \sum_{k=1}^i \sum_{t=1}^{j-1} Q_{kt} - \sum_{k=1}^{i-1} Q_{kj}) \times x_{ij}$$

V_{ij} – vendas anuais de peças com largura li e espessura ej

O modelo é sujeito a algumas restrições, sendo a primeira referente à limitação de uma largura selecionada por cada espessura diferente, $x_{ij} \leq 1$. O objetivo desta restrição é limitar o número de larguras escolhidas por espessura, pois não podem ser selecionadas demasiadas medidas *standard* e porque o corte na espessura é mais custoso do que o corte na largura, limitar o número de larguras escolhidas para maximizar o de espessuras. A segunda restrição é de quantidade e garante que as peças encomendadas não permaneçam em *stock* por mais de quatro meses:

$$Q_{ij} \geq 4m_j - (1 - x_{ij})M, \forall ij \quad (M \rightarrow \infty)$$

m_j - mínimo peso de encomenda de uma barra com espessura j

A terceira restrição tem como função garantir que todas as medidas referentes às vendas, são cobertas por pelo menos uma medida *standard*:

$$\sum_{k=i}^{n_i} \sum_{t=j}^{n_j} x_{kt} \times M \geq V_{ij}, \forall ij$$

O objetivo do modelo é minimizar o custo do corte das peças *standard*, F . Para isso, foi introduzido um conceito ao qual se deu o nome de complexidade de corte, C_{ij} :

$$C_{ij} = s \times i + s \times j$$

A complexidade de corte corresponde à soma entre dois produtos: o primeiro entre comprimento da peça *standard* e a largura da peça final e o segundo entre o comprimento da peça *standard* e a espessura da peça final.

Posteriormente, é necessário calcular o custo correspondente a essa área cortada e atribui-se o valor de um 1,5 u.m. ao corte de um milímetro quadrado na espessura e de 1 u.m. ao corte de um milímetro quadrado na largura. A explicação para esta diferença no custo reside no facto de, para uma peça ser cortada na espessura, a posição do serrote ter de ser alterada o que incrementa bastante o tempo de corte.

O objetivo do modelo é definido portanto por:

$$\left(\sum_i \sum_j x_{ij} \times C_{ij} \right) \times \text{custocorte}$$

4.1 Modelo

De seguida apresenta-se o modelo desenvolvido e acima descrito:

Índices

O modelo utiliza cinco índices, sendo eles:

- i - corresponde às peças *standard* com largura i;
- j - corresponde às peças *standard* com espessura j;
- s - corresponde às peças *standard* com comprimento s;
- k - corresponde às peças não *standard* com largura k;
- t - corresponde às peças não *standard* com espessura t.

A seguir são apresentados os vários índices do problema:

$$i = 1, \dots, n_i$$

$$j = 1, \dots, n_j$$

$$s = 1, \dots, n_s$$

$$k = 1, \dots, n_k$$

$$t = 1, \dots, n_t$$

Dados

Os dados do problema são:

cs – comprimento *standard*

li – largura *standard*

ej – espessura *standard*

V_{ij} – vendas anuais de peças com largura li e espessura ej

VA_{ij} – vendas anuais acumuladas de peças com largura até li e espessura até ej

$$VA_{ij} = \sum_{k=1}^i \sum_{t=1}^j V_{kt}$$

m_j - mínimo peso de encomenda de uma barra com espessura j

Variáveis de decisão

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

– Igual a 1 se a medida (li , ej) for considerada medida de encomenda (*standard*)

– Igual a 0 se não

As variáveis de decisão são binárias correspondendo ao valor 1 as peças *standard* e ao valor 0 as não *standard*.

Variáveis auxiliares

$Q_{ij} \geq 0$ Corresponde ao peso total anual de vendas associado à medida (li , ej)

$$Q_{ij} = (V_{ij} - \sum_{k=1}^i \sum_{t=1}^{j-1} Q_{kt} - \sum_{k=1}^{i-1} Q_{kj}) \times x_{ij}$$

$$\left(V_{ij} - \sum_{k=1}^i \sum_{t=1}^{j-1} Q_{kt} - \sum_{k=1}^{i-1} Q_{kj} \right) = B_{ij}$$

Linearizando:

$$Q_{ij} \leq B_{ij} + (1 - x_{ij})M$$

$$Q_{ij} \geq B_{ij} - (1 - x_{ij})M$$

B_{ij} Corresponde ao peso total coberto pela medida *standard* (li, ej)

$Y_{ijkt} \in \{0,1\}$ Igual a 1 se a medida (lk, et) for coberta pela medida (li, ej)

Igual a 0 se não

Restrições

Este problema apresenta diversas restrições, referentes ao transporte das peças *standard* e ao capital financeiro que é disponibilizado para a manutenção de peças em *stock*.

Desta forma as restrições são as seguintes:

- Máximo de uma largura por espessura:

$$\sum_i x_{ij} \leq 1, \forall j$$

De facto, se for permitido seleccionar mais do que uma largura por medida de espessura, no final ter-se-á demasiadas medidas *standard*, o que não é pretendido pela empresa. Assim, esta restrição permite que sejam seleccionadas mais medidas *standard* com espessuras diferentes, já que a dimensão cujo corte é mais difícil é a espessura.

- Máximo de quatro meses em *stock*:

$$Q_{ij} \geq 4m_j - (1 - x_{ij})M, \forall ij \quad (M \rightarrow \infty)$$

$$x_{ij} = 0 \rightarrow Q_{ij} \geq 4m_j - M$$

$$x_{ij} = 1 \rightarrow Q_{ij} \geq 4m_j$$

- Todas as vendas são cobertas por, pelo menos uma medida *standard*:

$$\sum_{k=i}^{n_i} \sum_{t=j}^{n_j} x_{kt} \times M \geq V_{ij}, \forall ij$$

Coeficientes da função objetivo

Os coeficientes utilizados na função objetivo deste problema são os seguintes:

C_{ij} - corresponde à complexidade de corte

Custo de corte - assumido como 1,5 u.m./mm² para o corte feito na espessura e 1 u.m./mm² para o corte feito na largura.

Função Objetivo

A função objetivo do modelo pretende minimizar o custo de corte total (F). Este custo corresponde ao produto do custo de corte pelo somatório dos produtos das complexidades de corte (C_{ij}) pelas variáveis de decisão (x_{ij}).

De seguida apresenta-se a função da complexidade de corte:

$$C_{ij} = s \times i + s \times j$$

Para se obter a função objetivo bastas multiplicar a complexidade de corte pelas variáveis de decisão, ou seja:

$$\text{Min } F = \left(\sum_i \sum_j x_{ij} \times C_{ij} \right) \times \text{custocorte}$$

5 Implementação do modelo desenvolvido

Para o desenvolvimento desta dissertação, tanto a análise e tratamento dos dados como o modelo proposto foram desenvolvidas com recurso ao software Microsoft Office Excel. As ferramentas e funcionalidades providenciadas por este software permitiram a construção de um modelo totalmente automatizado, necessitando apenas da atualização do histórico dos dados das vendas de peças a cada ano.

Para implementar o modelo descrito no capítulo 4, foi utilizado o Microsoft Excel e o modelo foi resolvido com recurso ao “Solver do Excel”. Esta ferramenta permite determinar a solução ótima para uma dada função objetivo, neste caso de minimização, tendo em conta as variáveis de decisão assim como as restrições do problema.

Devido à limitação no número de variáveis que o Solver apresenta, o modelo foi implementado para apenas uma pequena parte dos dados, sendo apresentado neste relatório apenas dessa forma. Pela mesma razão optou-se por usar a forma não linear do problema (envolve menos variáveis) e usar o motor de otimização não linear do Solver.

A ferramenta foi desenvolvida sem usar como base a ferramenta atualmente utilizada pela empresa, que é um MRP. Aliás, a diferença entre as duas ferramentas é enorme. A ferramenta atual, o MRP, dá-nos apenas informação sobre as quantidades que devem ser adquiridas de cada conjunto de medidas *standard*. Já a ferramenta desenvolvida neste trabalho diz-nos quais devem ser essas medidas.

Nas figuras 10, 11, 12 e 13 está representada uma visão geral do modelo desenvolvido no MS Office Excel.

Na figura 10 é apresentada a primeira parte do modelo, da primeira folha do Excel, constituída pela tabela com as variáveis de decisão, duas tabelas auxiliares e duas das restrições do problema que foi possível integrar nesta versão de teste.

	Medidas						

Figura 10 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 1).

Na Figura 11 está representada a segunda parte do modelo da primeira folha do Excel, constituída por uma tabela auxiliar, as tabelas da função objetivo, os coeficientes da função objetivo, ou seja os custos de corte, e outras duas restrições do modelo.

Nas figuras 12 e 13 está representada a segunda folha do Excel onde são atribuídas as medidas *standard* a cada peça vendida, as medidas a cortar e é calculada a área a cortar em cada peça *standard*, tanto na espessura como na largura.

Otimização do sistema de gestão de peças de aço na empresa Ramada Aços, SA

[illegible]

Figura 11 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 2).

Linha	Col	Medic	Comp	Esp	Larg	PesoS	Corte (C/C)	Corte (E/E)
8	4	54	56539,6	30	450	5991,780504	55861,56597	10
7	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	55829,56597	0
3	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56349,56597	0
5	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56239,56597	2
6	5	54	56539,6	30	450	5991,780504	56269,56597	5
10	3	54	56539,6	30	450	5991,780504	56074,56597	15
5	4	54	56539,6	30	450	5991,780504	56335,56597	11
4	5	54	56539,6	30	450	5991,780504	56365,56597	9
3	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56481,56597	0
3	5	54	56539,6	30	450	5991,780504	56039,56597	5
3	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56039,56597	0
3	5	54	56539,6	30	450	5991,780504	56039,56597	5
10	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	55694,56597	0
7	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	55954,56597	0
6	2	15	1428,68	10	300	33,645414	828,68	0
4	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56304,26597	2,7
4	6	54	56539,6	30	450	5991,780504	56304,26597	2,7
3	4	54	56539,6	30	450	5991,780504	56372,56597	14
3	4	54	56539,6	30	450	5991,780504	56385,56597	11
3	4	54	56539,6	30	450	5991,780504	56385,56597	11

Figura 12 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 3).

Corte (L/L)	Areaacortar Espessura (mm2)	Areaacortar Largura (mm2)	Peso do q fica em stc
124	565395,6597	7010906,181	543,7564832
160	0	9046330,556	0
376	0	21258876,81	0
265	113079,1319	14982984,98	233,9847142
220	282697,8299	12438704,51	485,8877022
20	848093,4896	1130791,319	132,0556029
296	621935,2257	16735711,53	1439,914532
345	508856,0938	19506150,26	1373,868396
397	0	22446207,69	0
377	282697,8299	21315416,37	829,2314676
360	0	20354243,75	0
355	282697,8299	20071545,92	780,8413024
34	0	1922345,243	0
195	0	11025215,37	0
75	0	107151	0
344,7	152656,8281	19489188,39	411,3542658
344,7	152656,8281	19489188,39	411,3542658
396	791553,9236	22389668,13	2453,35662
350	621935,2257	19788848,09	1704,112768
350	621935,2257	19788848,09	1704,112768

Figura 13 - Vista geral do modelo desenvolvido em Excel (parte 4).

Agora será descrito de forma mais detalhada cada passo da implementação do modelo no MS Office Excel:

O primeiro passo na implementação consiste em representar as variáveis de decisão. Para isso, é construída uma tabela “Largura Vs Espessura” onde cada célula dentro da tabela, na área laranja, pode ter o valor 1 quando esse conjunto de medidas (Largura/ Espessura) é considerado *Standard* e 0 quando não. No total estão representadas como variáveis de decisão 54 células diferentes, como se pode observar na Figura 14.

Os valores da espessura começam em 5 mm e vão aumentando de 5 em 5 mm até aos 30mm. No caso da largura, esta começa em 50mm e aumentam de 50 em 50mm até aos 450 mm. Portanto, as menores dimensões de uma peça standard possível é de 50x5mm e as maiores de 450x30mm.

Largura\Espessura	5	10	15	20	25	30
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0
450	0	0	0	0	0	0

Figura 14 - Representação em Excel das variáveis de decisão.

De forma automática, no sentido de minimizar a função objetivo, o solver atribui o valor 1 às células necessárias ficando as restantes com valor 0. Esta ação está representada na Figura 15.

Largura\Espessura	5	10	15	20	25	30
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	0	1	0	0	0	0
300	0	0	0	1	0	0
350	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0
450	0	0	0	0	0	1

Figura 15 - Atribuição do valor 1 a algumas das variáveis de decisão binárias.

Depois disto, numa outra tabela, representada na Figura 16, são apresentados os números de célula referentes aos conjuntos de medidas *standard*. Para exemplificar, a partir da Figura 15, pode-se dizer que a célula 15 (quinta linha e segunda coluna da área a branco) composta pelo conjunto de medidas - 250mm de largura e 10mm de espessura - foi escolhida pelo solver como sendo *standard*.

Largura / Espessura	5	10	15	20	25	30	10000
50							
100							
150							
200							
250		14					
300				33			
350							
400							
450						54	
10000							

Figura 16 - Indicação do número das células às quais foi atribuído o valor 1.

Após esta ação, numa outra tabela semelhante, é indicada, em cada célula, qual o conjunto de medidas *standard* que irá abastecer o conjunto de medidas representado por essa célula. A mesma é representada pela Figura 17.

Observando a Figura17, pode ver-se que, por exemplo as peças com largura igual a 50mm e espessura de 5mm são abastecidas pela medida representada pela 14ª célula da tabela da Figura 15, ou seja, é abastecida por peças com 250mm de largura e 10mm de espessura.

Nas tabelas das figuras 16 e 17 existe mais uma linha e uma coluna em relação às duas tabelas das figuras anteriores 14 e 15, pelo simples fato de existirem, nos registos de vendas, peças com medidas superiores às estudadas na amostra dos dados desta versão de teste. Daí adicionar-se um número suficientemente grande que permitisse cobrir todas as medidas.

Largura / Espessura	5	10	15	20	25	30	10000
0							
50	14	14	33	33	54	54	0
100	14	14	33	33	54	54	0
150	14	14	33	33	54	54	0
200	14	14	33	33	54	54	0
250	14	14	33	33	54	54	0
300	33	33	33	33	54	54	0
350	54	54	54	54	54	54	0
400	54	54	54	54	54	54	0
450	54	54	54	54	54	54	0
10000	0	0	0	0	0	0	0

Figura 17 - Indicação das medidas que abastecem as restantes inferiores.

Depois de serem apresentados os valores da Figura 17 é necessário construir uma outra tabela (auxiliar), onde são indicados, em primeiro o número da célula, em segundo a largura e em terceiro a espessura. Nesta tabela, apenas são revelados os valores da espessura e largura das medidas que obtiveram o valor 1 na Figura 15. A Figura 18 corresponde a esta fase.

Medida	EspS	LargS
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14	10	250
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

30		
31		
32		
33	20	300
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		
50		
51		
52		
53		
54	30	450

Figura 18 - Indicação das medidas Standard (Largura e Espessura).

Após serem escolhidas as medidas *standard*, numa outra folha do Excel onde se encontra o histórico de registo das vendas correspondentes ao período tratado neste trabalho, são calculados vários parâmetros referentes a essas mesmas medidas. Esses parâmetros são calculados individualmente para cada peça existente na folha do Excel e são: comprimento, largura e espessura da peça *standard* (barra), o seu peso, o comprimento que será cortado para obter a peça desejada a partir do comprimento da barra, a largura que será cortada para obter a peça desejada a partir da largura da barra, a espessura que será cortada para obter a peça desejada a partir da espessura da barra e a área que é cortada para se obter cada peça, apresentados esta ordem exata da esquerda para a direita (Figura 19).

CompS ▾	EspS ▾	LargS ▾	PesoS ▾	Corte (C/C) ▾	Corte (E/E) ▾	Corte (L/L) ▾	Areaacortar Espessura (mm2) ▾	Areaacortar Largura (mm2) ▾
43382	30	450	4597	42704	10	124	433819	5379361
43382	30	450	4597	42672	0	160	0	6941111
43382	30	450	4597	43192	0	376	0	16311610
43382	30	450	4597	43082	2	265	86764	11496215
43382	30	450	4597	43112	5	220	216910	9544027

Figura 19 - Valores calculados para cada venda a partir dos registos de vendas.

Para efetuar os cálculos necessários para preencher as várias colunas da tabela da Figura 19 recorre-se aos dados dos registos das vendas do período anterior como mostra a Figura 20. Os registos são relativos à quantidade de peças encomendadas pelos clientes, as suas dimensões (comprimento, largura e espessura) em mm e o seu peso em Kg.

Qntd	Comp	Larg	Espe	Peso
1	155	101	20	2,457835

Figura 20 - Indicação dos valores registados numa venda.

Definidas as variáveis de decisão, é altura de calcular o valor da função objetivo. O objetivo a minimizar é, portanto, o total da soma das áreas de corte associadas a cada medida *standard*.

O conjunto de células cuja soma representa o valor da função objetivo é apresentado na Figura 21.

Como se pode ver, apenas nas peças com medidas *standard* de 10mm de espessura e 250mm de largura, não há qualquer corte na espessura.

[illegible]

Figura 21 - Coeficiente da função objetivo.

De seguida, na Figura 22 é apresentada uma tabela com uma linha apenas na qual está inserido o custo de corte de 1mm^2 de uma peça, que diz respeito aos coeficientes da função objetivo. O custo é representado em unidades monetárias (u.m.) e é atribuído o valor 1,5 para o corte na espessura e o valor 1 para o corte na largura. A diferença no custo é justificada pela diferença nos tempos de corte para cada caso.

Custo de corte na espessura	1,5	Custo de corte na largura	1
-----------------------------	-----	---------------------------	---

Figura 22 - Custo de corte de 1mm^2 na a espessura e na largura.

É assim calculado o valor da função objetivo, representado na Figura 23, que resulta do produto entre os custos da complexidade de corte (Figura 22), pelo somatório de cada uma das áreas de corte de cada peça *standard* que se encontram na Figura 21.

Valor da FO	6675911652
-------------	------------

Figura 23 - Valor da função objetivo.

Por fim, é necessário adicionar as restrições. Estas vão garantir que não é escolhido apenas o maior conjunto de medidas como *standard* e, por outro lado, que não são escolhidas também demasiados conjuntos de medidas.

A primeira restrição, que está representada na Figura 24, pretende garantir que existe um limite de seleção de uma largura *standard* por cada valor de espessura.

Largura\Espessura	5	10	15	20	25	30
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	0	1	0	0	0	0
300	0	0	0	1	0	0
350	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0
450	0	0	0	0	0	1
Máximo de uma largura por espessura						
	0	1	0	1	0	1
	<=	<=	<=	<=	<=	<=
	1	1	1	1	1	1

Figura 24 - Adição da restrição “ Limite de uma largura por espessura”.

A segunda restrição (Figura 25), garante que todas as medidas possíveis são cobertas por pelo menos uma medida *standard*. Isto é conseguido “exigindo” que o conjunto das maiores medidas (espessura e largura) é sempre escolhido como *standard*.

Todas as vendas são cobertas por pelo menos uma medida standard		1	=	1
---	--	---	---	---

Figura 25 - Adição da restrição “Todas as vendas são cobertas por pelo menos uma medida *standard*”.

A figura 26 mostra-nos uma tabela que é imprescindível para uma restrição essencial ao problema. Essa restrição diz respeito à quantidade mínima de encomenda exigida pelos fornecedores. A tabela da figura 26 é preenchida pelos valores dos pesos correspondentes ao consumo de peças abastecidas por cada medida *standard*. Mais concretamente, a tabela mostra-nos que se as vendas no ano seguinte forem exatamente iguais às do período anterior, seria necessário comprar 34Kg da medida 10x300mm, 45Kg da medida 15x50mm e cerca de 6000 Kg da medida 30x450mm.

Peso correspondente ao vendido no período anterior
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
18,95618
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1454,028119
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
4597,401254
0
0
0
0
0

Figura 26 - Peso correspondente ao vendido no período anterior.

A partir da tabela representada na Figura 26 é possível, fazendo o somatório de todos os seus valores, calcular o valor total necessário para encomendar aos fornecedores. Uma das restrições impostas pelos fornecedores à Ramada Aços, foi que o mínimo de quantidade a encomendar para peças com espessuras inferiores a 40mm fosse superior ou igual a 6000kg. Como se pode ver na Figura 27, tal é satisfeito pois o peso total, consumido no período anterior, foi de cerca de 6070Kg, que é superior ao limite mínimo imposto de 6000Kg.

Mínimo de encomenda
6070
>=
6000

Figura 27 - Restrição “ Mínimo de encomenda”.

Esta restrição torna-se ainda mais significativa se forem adicionadas as outras três restrições semelhantes, que foram descritas no capítulo dois pois aqui estamos a considerar apenas uma pequena parte de todas as medidas possíveis, tendo as consideradas, espessura inferior a 40mm. Provavelmente, as medidas selecionadas como *standard* neste “teste”, não o serão quando se aplicar o modelo aos dados completos.

Todos os passos descritos neste capítulo são executados pelo MS Office Excel de forma automática, partindo da seleção das medidas *standard*.

Depois de todas as fórmulas estarem desenvolvidas no Excel, é possível introduzi-las no Solver em busca da solução ótima.

Na Figura 28, estão representados todos os parâmetros introduzidos no Solver para se obter uma solução ótima.

No primeiro parâmetro “Definir Objetivo” introduz-se o valor da célula apresentada na Figura 23. É esse valor que pretendemos minimizar, daí escolhermos a opção “Mínimo”.

No espaço das restrições adicionamos os conjuntos de células que as representam. A primeira restrição que diz respeito ao limite mínimo de encomenda de 6000 Kg, a segunda

que garante que é seleccionada apenas uma largura por cada valor de espessura, a terceira restrição é utilizada para garantir que todas as variáveis de decisão são binárias e a última que garante que todas as medidas são cobertas por pelo menos uma medida *standard* igualando-se a maior de todas a um.

Por fim basta acionar o botão “Tornar não negativas Variáveis não Constrangidas” e escolher o Método de resolução. Neste caso, como já foi referido, o escolhido foi “GRG Não Linear”.

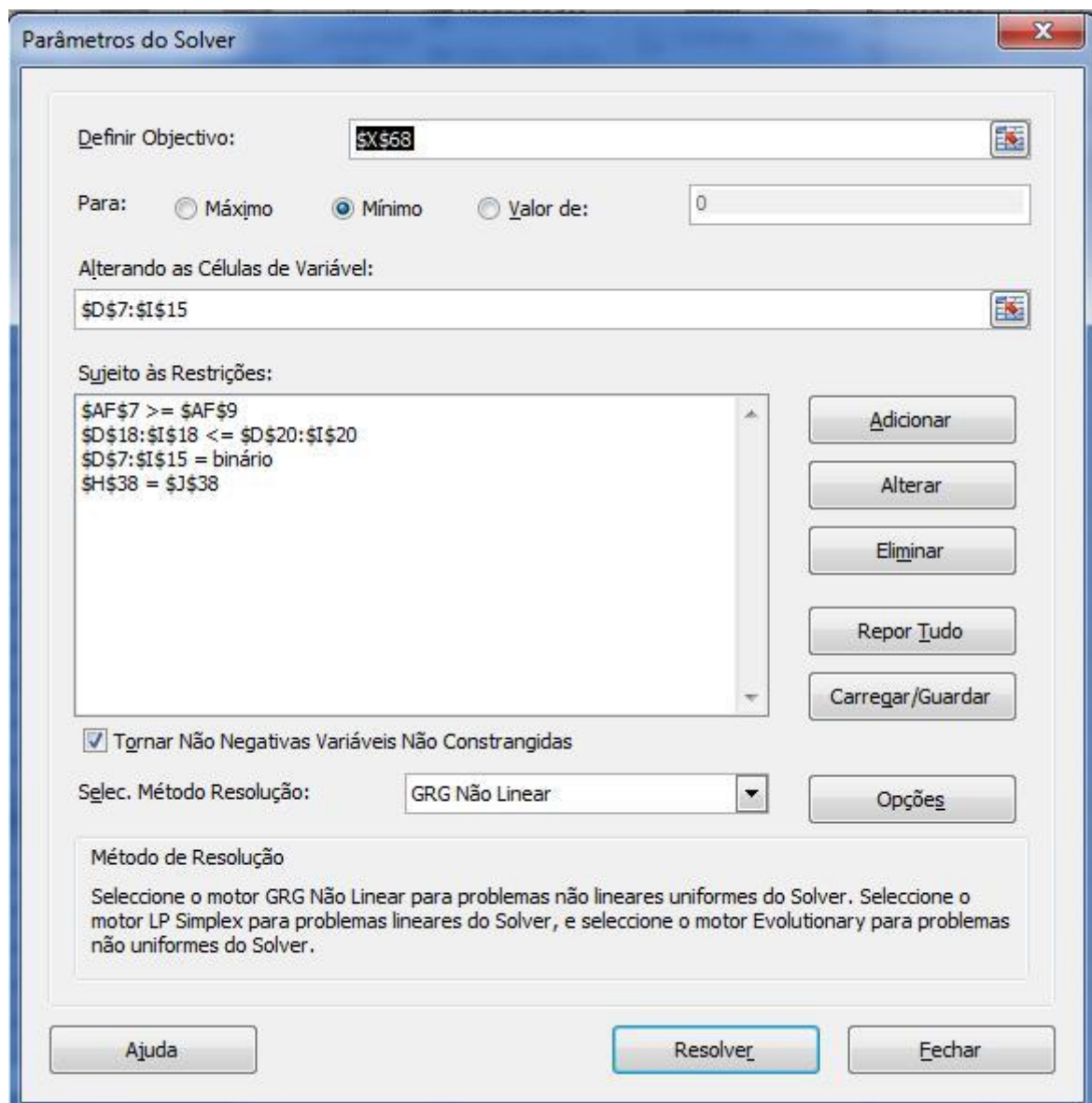


Figura 28 - Parâmetros introduzidos no Solver do MS Office Excel.

Definidos todos os parâmetros basta clicar em resolver e o Solver procura o valor mínimo para satisfazer a função objetivo, cumprindo todas as restrições. No final são atribuídos valores zero e um às variáveis de decisão assim como o valor da função objetivo.

6 Avaliação do modelo desenvolvido

Neste capítulo, primeiro são descritos os dados registados pela empresa e de seguida é feita uma avaliação do modelo complementada com alguns testes.

6.1 Dados do problema

Para ser possível dar início à procura e desenvolvimento de uma resposta para o problema proposto, foi necessário um primeiro passo dado pela empresa, fornecendo dados sobre as vendas, compras e *stocks* correspondentes ao período anterior, entre Maio de 2013 e Abril de 2014.

A Ramada Aços mantém registos de todas as vendas e compras que faz, assim como de todas as peças que mantém em *stock*. Esses registos constituem o ponto inicial deste trabalho.

A informação a reter dos registos de vendas, imprescindível para o desenvolvimento do modelo, são as medidas das peças e o seu peso. Será apenas estudada uma qualidade de aço, a 2738 SUPER que tem uma densidade de $7,85 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$.

Na figura 29, está representada uma pequena parte dos dados referentes às vendas no período estudado. A folha de registo no sistema relativa às peças vendidas é composta por sete colunas, e o número de linhas é igual ao número de peças de medidas diferentes vendidas. No total, para o período em questão, foram estudadas 4179 peças com medidas diferentes. Segue-se a descrição de cada coluna:

- Na primeira coluna, o primeiro número corresponde ao número da encomenda e o segundo à linha de encomenda. Os números de encomenda são sempre diferentes, as linhas iniciam em 5 e variam de 5 em 5 dentro da mesma encomenda, indicando a compra de várias peças de dimensões e/ou qualidade de aço diferentes para o mesmo cliente;
- A segunda coluna diz respeito à quantidade encomendada de peças com um determinado conjunto de medidas;
- As três colunas seguintes dão-nos informação sobre as medidas da peça, sendo elas: comprimento, largura e espessura (em mm);
- As duas últimas colunas indicam, respetivamente, a data em que a encomenda foi feita e a sua data de entrega.

Encomenda	Qntd	Comp	Larg	Espe	Peso	DataEncomenda	DataEntrega
836099/10	2	134	58	49	5,9789996	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-07 00:00:00.000
836076/10	2	320	63	35	11,07792	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-06 00:00:00.000
835967/55	4	210	64	44	18,568704	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-06 00:00:00.000
835897/20	1	175	90	60	7,41825	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-17 00:00:00.000
835897/30	1	155	101	20	2,457835	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-17 00:00:00.000
836071/30	2	690	170	95	174,95295	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-03 00:00:00.000
835897/15	1	578	235	233	248,4398615	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-14 00:00:00.000
835897/25	1	265	261	254	137,9080935	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-17 00:00:00.000
836076/5	1	350	265	45	32,7639375	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-03 00:00:00.000
835897/10	1	608	297	233	330,2825328	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-13 00:00:00.000
835915/5	1	400	300	82	77,244	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-03 00:00:00.000
835915/10	1	400	300	82	77,244	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-06 00:00:00.000
835923/10	1	400	320	82	82,3936	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-07 00:00:00.000
835923/5	1	400	320	92	92,4416	2013-05-02 00:00:00.000	2013-05-03 00:00:00.000

Figura 29 - Exemplo de dados referentes às vendas do período anterior.

6.2 Avaliação dos resultados

O modelo desenvolvido neste trabalho constitui já um avanço para a gestão de aprovisionamentos da Ramada Aços, SA e, portanto, um ponto de partida para uma eficiente gestão das compras da empresa, através de uma maior automatização na escolha e decisão das peças a comprar. Podemos assim classificar esta ferramenta, como uma ferramenta de apoio à decisão.

Na figura 30 está representada a janela de Resultados do Solver que informa de que foi encontrada uma solução ótima para o problema. Aí seleciona-se a opção “Manter Solução do Solver” e escolhe-se o Relatório de Resposta para este ser gerado.

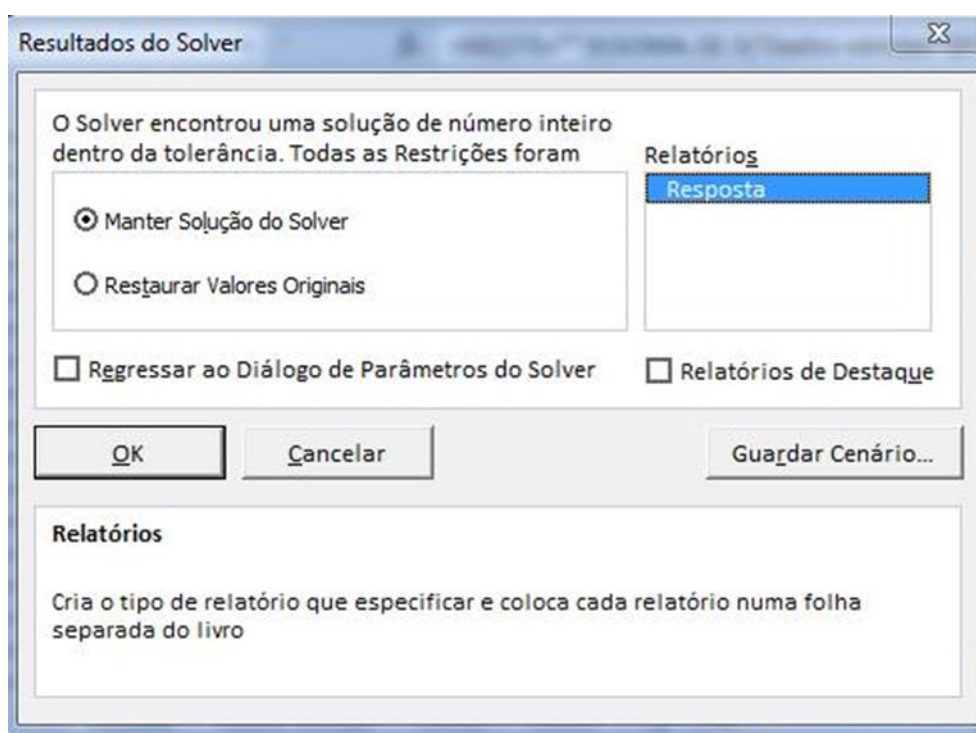


Figura 30 - Janela de resultados do Solver.

Quando o relatório de resposta é gerado, é fornecida alguma informação sobre o desempenho de procura por parte do motor do Solver. A principal informação a reter está relacionada com o motor utilizado, ou seja, GRG não linear, neste caso, o tempo de solução que foi de 853,419 segundos, com a realização de três iterações. Este tempo altera-se sempre que se utiliza um motor diferente. Esta informação pode ser visualizada na Figura 31.

Microsoft Excel 14.0 Relatório de Resposta
 Folha de Cálculo: [Ferramenta_Versão curta para testes.xlsx]Modelo
 Relatório Criado: 26-02-2015 00:24:51
 Resultado: O Solver encontrou uma solução. Todas as restrições e condições de optimização foram satisfeitas.
 Motor do Solver
 Motor: GRG Não Linear
 Tempo de Solução: 853,419 Segundos.
 Iterações: 3 Subproblemas: 0
 Opções do Solver
 Tempo Máximo Ilimitado, Iterações Ilimitado, Precision 0,000001
 Convergência 0,0001, Tamanho da População 0, Seed Aleatório 0, Derivadas Adiantadas
 Máximo de Subproblemas Ilimitado, Máximo de Soluções de Número Inteiro Ilimitado, Tolerância de Número Inteiro 1%, Assumir NãoNegativo

Figura 31 - Janela de descrição de parâmetros do Solver.

Nas figuras 32,33 e 34 está representado o relatório de resposta do solver, dividido em três partes. A primeira parte, e presente na figura 32, corresponde ao valor da função

objetivo. O valor obtido foi de 6.675.911.652 u.m e corresponde ao valor ótimo de custo de corte total.

Célula de Objectivo (Mínimo)

Célula	Nome	Valor Original	Valor Final
\$X\$68	Valor da FO Corte na espessura	9306307826	6675911652

Figura 32 - Parte do relatório de resposta do Solver - Função Objetivo.

Na Figura 33 mostra-se o valor atribuído a cada variável de decisão, 0 ou 1. As células com valor 1 no “valor final” são representativas de peças *standard*, e as com valor 0 no “valor final” não. No total foram seleccionadas três medidas como *standard*, ou seja, com o valor 1.

Células de Variável

Célula	Nome	Valor Original	Valor Final	Número inteiro
\$D\$7		0	0 Binário	
\$E\$7		0	0 Binário	
\$F\$7		0	0 Binário	
\$G\$7		0	0 Binário	
\$H\$7		0	0 Binário	
\$I\$7		0	0 Binário	
\$D\$8		0	0 Binário	
\$E\$8		0	0 Binário	
\$F\$8		0	0 Binário	
\$G\$8		0	0 Binário	
\$H\$8		0	0 Binário	
\$I\$8		0	0 Binário	
\$D\$9		0	0 Binário	
\$E\$9		0	0 Binário	
\$F\$9		0	0 Binário	
\$G\$9		0	0 Binário	
\$H\$9		0	0 Binário	
\$I\$9		0	0 Binário	
\$D\$10		0	0 Binário	
\$E\$10		0	0 Binário	
\$F\$10		0	0 Binário	
\$G\$10		0	0 Binário	
\$H\$10		0	0 Binário	
\$I\$10		0	0 Binário	
\$D\$11		0	0 Binário	
\$E\$11		1	1 Binário	
\$F\$11		0	0 Binário	
\$G\$11		0	0 Binário	
\$H\$11		0	0 Binário	
\$I\$11		0	0 Binário	
\$D\$12		0	0 Binário	
\$E\$12		0	0 Binário	
\$F\$12		0	0 Binário	
\$G\$12		1	1 Binário	
\$H\$12		0	0 Binário	
\$I\$12		0	0 Binário	
\$D\$13		0	0 Binário	
\$E\$13		0	0 Binário	
\$F\$13		0	0 Binário	
\$G\$13		0	0 Binário	
\$H\$13		0	0 Binário	
\$I\$13		0	0 Binário	
\$D\$14		0	0 Binário	
\$E\$14		0	0 Binário	
\$F\$14		0	0 Binário	
\$G\$14		0	0 Binário	
\$H\$14		0	0 Binário	
\$I\$14		0	0 Binário	
\$D\$15		0	0 Binário	
\$E\$15		0	0 Binário	
\$F\$15		1	0 Binário	
\$G\$15		0	0 Binário	
\$H\$15		1	0 Binário	
\$I\$15		1	1 Binário	

Figura 33 - Parte do relatório de resposta do Solver - Variáveis de decisão.

Por fim, na figura 34 apresentam-se as restrições do modelo. Como podemos observar na figura, o mínimo de encomenda foi ultrapassado em 70Kg, nunca foi selecionada mais do que uma largura por espessura e está garantido que todas as medidas são cobertas por pelo menos uma medida *standard*.

Restrições						
Célula	Nome	Valor da Célula	Fórmula	Estado	Margem	
\$AF\$7	Mínimo de encomenda	6070,385553	\$AF\$7>=\$AF\$9	Sem Enlace	70,38555285	
\$D\$18	Máximo de uma largura por espessura	0	\$D\$18<=\$D\$20	Sem Enlace	1	
\$E\$18		1	\$E\$18<=\$E\$20	Enlace	0	
\$F\$18		0	\$F\$18<=\$F\$20	Sem Enlace	1	
\$G\$18		1	\$G\$18<=\$G\$20	Enlace	0	
\$H\$18		0	\$H\$18<=\$H\$20	Sem Enlace	1	
\$I\$18		1	\$I\$18<=\$I\$20	Enlace	0	
\$H\$38	Todas as vendas são cobertas por pelo menos uma medida standard	1	\$H\$38=\$J\$38	Enlace	0	
\$D\$7:\$I\$15=Binário						

Figura 34 - Parte do relatório de resposta do Solver - Restrições.

Todas as restrições exigidas foram satisfeitas e a função objetivo foi minimizada. O Solver atribuiu o valor um, ou seja, selecionou como medidas *standard* as medidas (espessura x largura):

- 10 x 250mm;
- 20 x 300mm;
- 30 x 450mm.

Portanto, todas as outras medidas serão abastecidas, ou cortadas a partir da peça com as medidas superiores mais próximas das três mencionadas em cima que o Solver selecionou como *standard*.

6.3 Testes ao modelo

De forma a testar a consistência do modelo foram alterados alguns valores em restrições e coeficientes tendo sido analisados os resultados obtidos.

Na figura 35 pode-se visualizar que, se aumentarmos o número máximo de larguras selecionadas por espessura de um para três, por exemplo, de forma a minimizar a função objetivo são selecionadas mais medidas *standard*. Se, por um lado, esta mudança na restrição diminuiria o custo que a empresa teria em cortes, por outro, aumentaria a quantidade de peças com *medidas standard*, que é algo que a empresa pretende diminuir desde o início deste trabalho.

Medidas						
Largura\Espessura	5	10	15	20	25	30
50	0	0	1	0	0	0
100	0	0	1	1	0	0
150	0	0	0	1	0	0
200	0	0	0	0	1	0
250	0	1	0	0	0	0
300	0	1	0	1	0	0
350	0	0	0	0	1	1
400	0	0	0	0	0	1
450	0	0	1	0	1	1
Máximo de uma largura por espessura						
	0	2	3	3	3	3
	<=	<=	<=	<=	<=	<=
	3	3	3	3	3	3

Figura 35 - Alteração da restrição "Máximo de larguras por espessura".

Na figura 36 podemos ver que para esta situação, o valor da função objetivo diminuiria para 2.259.724.717 u.m., correspondendo a uma redução de 66%.

Valor da FO	2259724717
-------------	------------

Figura 36 - Valor da função objetivo com alteração da restrição "Máximo de larguras por espessura".

Noutra situação, foi feita uma troca nos custos de corte, ou seja, atribuiu-se ao corte na espessura, um custo de 1u.m./mm² e ao corte na largura um custo de 1,5u.m./mm², como se pode ver na figura 37.

Custo de corte na espessura	1	Custo de corte na largura	1,5
-----------------------------	---	---------------------------	-----

Figura 37 - Alteração dos custos de corte.

O resultado alterou-se significativamente, como se pode visualizar na figura 38. Neste caso, foram selecionadas como medidas *standard* cinco conjuntos, sendo eles (espessura x largura):

- 10x250mm;
- 15x450mm;
- 20x300mm;
- 25x450mm;
- 30x450mm.

Largura\Espessura	5	10	15	20	25	30
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	0	1	0	0	0	0
300	0	0	0	1	0	0
350	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0
450	0	0	1	0	1	1

Figura 38 - Escolha de medidas *standard* com alteração dos custos de corte.

Com esta alteração, e como se pode ver na figura 39, o valor da função objetivo alterou-se para 13.933.251.438 u.m., correspondendo a um aumento de 108%.

Valor da FO	13933251438
-------------	-------------

Figura 39 - Valor da função objetivo quando os custos de corte são alterados.

Com a realização destes testes é possível demonstrar a versatilidade do modelo, pois alterando os valores das restrições e coeficientes, o mesmo procura e devolve a solução que minimiza o custo de corte de peças.

7 Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

A Ramada Aços compra peças de aço de grandes dimensões (*standard*) aos seus fornecedores, cortando-as no seu armazém nas medidas pedidas pelos seus clientes e vendendo-as portanto, a retalho. As operações de corte nestas peças são bastante demoradas, pelo que a empresa tem interesse em reduzi-las. Quando se pretende cortar uma peça pela sua espessura, a tarefa é ainda mais difícil, pois é necessário alterar a posição do serrote, demorando o corte ainda mais tempo. Como tal, a empresa compra as peças com medidas *standard* maximizando o número de peças com espessuras diferentes.

O objetivo proposto para este trabalho consistiu em redefinir as medidas *standard* que são compradas pela Ramada Aços. No início do trabalho foi estudada a forma como a empresa fazia a gestão de compras e foi possível observar no armazém que, as medidas *standard* atualmente definidas não são as mais adequadas, por estar a acontecer uma acumulação de peças em *stock*. A ferramenta usada pela empresa para auxiliar na gestão das compras é um MRP, tendo as medidas *standard* sido selecionadas uma vez com base na tabela representada na Figura 7. A ferramenta MRP usada pela empresa apenas lhes fornece informação sobre a quantidade de cada medida que deve encomendar.

Foi desenvolvido um modelo (capítulo 4), que permite selecionar, a uma dada altura, as medidas *standard* mais apropriadas para o período de um ano, tendo em conta o histórico de registos de vendas do ano anterior.

No fim deste trabalho temos uma ferramenta construída em Excel que seleciona as medidas *standard* mais apropriadas baseando-se no histórico de vendas da empresa. Esta seleção é feita, com o objetivo de minimizar o corte efetuado nas peças de medidas *standard*.

O problema tratado neste trabalho é complexo, pelo que necessita de algum aperfeiçoamento e estudo. Trata-se pois, de um problema relacionado com a área da Investigação Operacional pelo que foi desenvolvida uma ferramenta de apoio baseada em fatos antigos, ou seja, baseada num histórico.

No final deste trabalho ficaram definidas algumas dimensões de peças *standard* para apenas uma amostra dos dados existentes. O próximo passo deverá ser a aplicação do modelo a todos os dados.

A ferramenta desenvolvida neste trabalho permite redefinir as Medidas *Standard* dos blocos a comprar sempre que se desejar (por exemplo, de ano a ano) bastando para isso atualizar os registos de vendas.

7.2 Desenvolvimentos futuros

A melhor forma para gerir aprovisionamentos deste tipo será através de uma previsão do mercado. Para tal é necessário registar, informatizar e tratar os dados registados nos períodos anteriores.

É importante salientar que a utilização do modelo apresentado neste trabalho não dispensa, na totalidade, a ação do gestor de aprovisionamentos, pois o mercado encontra-se em constante mudança, apresentando sempre oscilações em relação ao seu passado.

O modelo desenvolvido neste trabalho constitui o ponto de partida para a mudança da gestão de aprovisionamentos e compras da empresa Ramada Aços, SA. Como tal, há ainda muitos aspetos a serem melhorados e o aperfeiçoamento da ferramenta deve ser objeto de trabalho futuro.

Para futuros trabalhos será interessante adicionar ao modelo apresentado neste trabalho, restrições em relação à forma de como serão cortados os blocos de aço. No presente trabalho apenas foi estudada uma das situações possíveis, na qual a largura de uma peça é sempre obtida a partir da largura da peça inicial, o comprimento a partir do comprimento e a espessura a partir da espessura. Tal não é sempre verdade, podendo em várias ocasiões ser mais vantajoso cortar a peça inicial de outra forma.

Referências

- [1] Bortfeldt, A., Wäscher, G., 2013. Constraints in container loading - A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, Volume 229, 16 Agosto 2013, pp.1-20.
- [2] Allen, S.D., Burke, E.K., Kendall, G., 2011. A hybrid placement strategy for the three-dimensional strip packing problem. *European Journal of Operational Research*, 207, pp.219-227.
- [3] Queiroz, T.A., Miyazawa, F.K., Wakabayashi, Y., Xavier, E.C., 2012. Algorithms for 3D guillotine cutting problems: Unbounded knapsack, cutting stock and strip packing. *Computers & Operations Research*, 39, pp.382-392.
- [4] D.W. Pentico, 2008. The assortment problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, 190(2):295 - 309.
- [5] J.E. Beasley, 1985. An algorithm for the two-dimensional assortment problem. *European Journal of Operational Research*, 19(2):253 - 261.
- [6] D.D. Gemmill and J.L.Sanders., 1991. A comparison of solution methods for the assortment problem. *International Journal of Production Research*, 29(12):2521-2527.
- [7] D.D. Gemmill, 1992. Solution to the assortment problem via the genetic algorithm. *Mathematical and Computer Modelling*, 16(1):89 - 94.
- [8] P.K. Agrawal, 1993. Determining stock-sheet-sizes to minimise trim loss. *European Journal of Operational Research*, 64(3):423 - 431.
- [9] O. Holthaus, 2003. On the best number of different standard lengths to stock for one-dimensional assortment problems. *International Journal of Production Economics*, 83(3):233 - 246.
- [10] N. Kasimbeyli, T. Sarac, and R. Kasimbeyli, 2011. A two-objective mathematical model without cutting patterns for one-dimensional assortment problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(16):4663 - 4674.

Anexos digitais

- [11] - Ferramenta desenvolvida: versão de teste